第47卷 第3期
2024年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 3
Mar. 2024

"双碳"目标下黄河流域城市绿色发展效率测度及提升路径

石彩霞， 贺小荣

（湖南师范大学旅游学院，湖南 长沙 410081）

摘 要：研判城市绿色发展效率及其优化路径，是推进黄河流域高质量发展的关键环节，亦是践行"碳达峰、碳中和"战略目标的重要方略。利用EBM-GML模型测算2005—2020年黄河流域58个城市的绿色发展效率，依次采用HP滤波分析、时空交互方法勾勒其演化特征，并对其多元提升路径进行定量识别。结果表明：(1) 研究期内黄河流域城市绿色发展效率呈增长态势，由2005年的0.509提升至2020年的0.651，相继经历"波动—提升—共生"3个阶段，区域内部非均衡性特征显著。(2) 黄河流域城市绿色发展效率局部空间结构具有良好的稳健性，空间移动方向波动性较强，城际空间协作程度大于空间竞争。(3) 模糊集定性比较分析（fsQCA）结果表明，存在经济驱动型、双元驱动型、资源整合型、全面提升型4条优化路径，经济发展、科技创新等因素为必要条件。

关 键 词："双碳"目标；城市绿色发展效率；时空交互；fsQCA；黄河流域

文章编号：1000－6060(2024)03－0528－11(0528～0538)

党的二十大报告强调，要加快发展方式绿色转型，推动形成绿色低碳的生产方式和生活方式。黄河流域是我国高质量发展的重要实验区，也是国家生态安全的关键屏障，在促进经济社会发展与优化国土空间开发格局中起到关键作用[1]。新世纪以来，黄河流域通过全域统筹和科学调控，绿色发展成效显著，但由于其生态基底薄弱，资源环境承载力有限[2]，沿黄城市不平衡不充分发展问题日益突出[3]。在"碳达峰、碳中和"战略目标下，探索黄河流域城市绿色发展效率时空演进特征及其优化路径，对破除沿黄城市倚能倚重桎梏、构建国土空间保护新格局、助力区域绿色高质量发展具有重要意义。

"绿色发展"作为学界讨论热点，已有一定研究基础，大致分为4类：(1) 概念、内涵解读。狭义上，从经济增长层面讨论绿色发展，如绿色经济[4]、低碳经济[5]、生态经济[6]等；广义上，强调绿色发展全覆盖，即经济、社会、政治、文化和生活方式的"绿色化"，提出低碳发展[7]、生态城市[8]、韧性城市[9]等理念。(2) 发展效率测度。主要有指标体系评价与生产效率测度2类方法：指标体系评价法有经济合作与发展组织（OECD）绿色增长评估框架[10]、联合国环境规划署（UNEP）绿色经济测度模型[11]，北京师范大学等机构的绿色发展指数评估模型等[12]；效率测度法包括传统径向DEA模型[13]、非径向的SBM模型[14]和混合距离函数（EBM）模型[15]等。(3) 演化特征及影响因素。学者们从全球[16]、全国[17]、省域[18]、市域[19]层面聚焦绿色发展时空异质性，GIS空间分析方法[20-21]、障碍度模型[22]、BP时间序列预测模型[23]等是常用方法。(4) 提升路径与改进措施。陈明华等[1]、郭付友等[2]、孙金欣等[24]认为经济环境、政策体制等因素制约城市绿色发展；师博[25]强调培育绿色发展体系、强化城市硬件保障可提高城市发展质量。

综上所述，绿色发展研究视角不断丰富和延

收稿日期：2023-07-17； **修订日期**：2023-08-03

基金项目：国家社会科学基金后期资助项目（21FGLB070）；湖南省自然科学基金项目（2022JJ30387）；湖南省国内一流培育学科建设项目（5010002）资助

作者简介：石彩霞（1995-），女，博士研究生，主要从事城市地理研究. E-mail: scx_hunnu@163.com

通讯作者：贺小荣（1972-），男，教授，博士生导师，主要从事旅游地理研究. E-mail: he1502@126.com

伸，但其内涵解构及评价体系仍存在改进空间，黄河流域等生态脆弱区市域差异的研究略显薄弱，且仅从单一时间或静态空间层面揭示其演变特征，尚未从时空交互层面揭示其演进过程变化，有关提升路径的探讨暂未推至实证。因此，本文借助EBM-GML模型测算绿色发展效率，采用HP滤波分析、时空交互方法勾勒其演化特征，并通过模糊集定性比较分析法（fsQCA）探明多元提升路径，以期为筑牢黄河流域生态安全屏障，打造人与自然和谐共生的美丽中国样板提供实证依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

由《国家“十三五”规划纲要》可知，重点建设的国家级城市群中分布在黄河沿线的有7个，共计61个地级市。2020年，辖区生产总值为25.390×10^{12}元，常住人口约4.200×10^{8}，水资源开发利用率达80%，远超40%的生态警戒线，生态脆弱区分布广、类型多，沿黄城市产业倚能倚重、低质低效问题突出[3]。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略，沿黄城市绿色发展效率的研究显得尤为迫切[2]。

1.2　数据来源

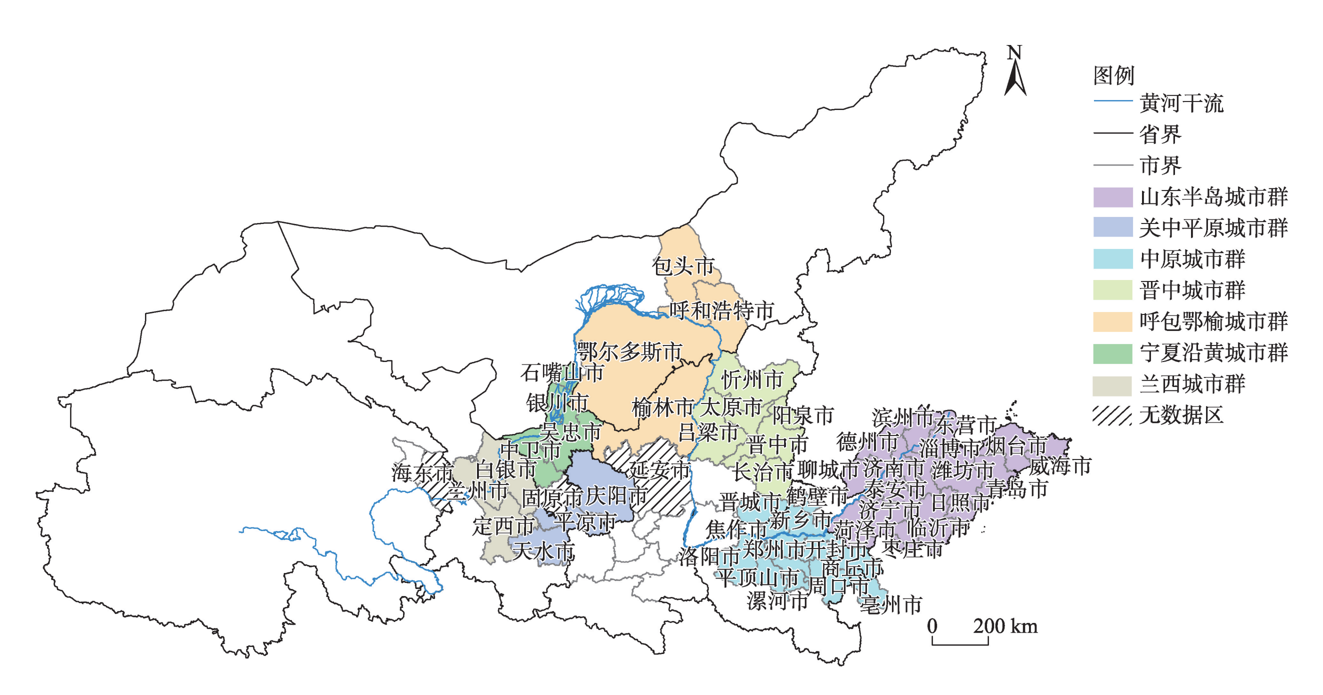
鉴于各自治州、盟统计口径不一致，数据较难获取，同时部分地级市行政区划调整，如莱芜市于2019年并入济南市，因而本文以2020年地级市为基准，将合并城市数据排除在外，选取黄河流域7个城市群所涵盖的58个地级市作为研究对象（图1）。文中数据均来自2006—2021年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各地级市统计年鉴与国民经济统计公报；碳排放数据参考Chen等[26]的做法计算得来。

1.3　指标体系构建

本文结合“碳达峰、碳中和”战略目标，重点考察黄河流域城市以较少投入得到较多期望产出与较少非期望产出的绿色发展能力。参考童昀等[15]、丁玉龙等[27]和李治国等[28]的研究，选取指标构建评估体系（表1）。其中，投入层强调城市在劳动、资本、能源方面的倾斜程度；产出层体现期望产出与非期望产出的实际效果。此外，本文将“城市CO_2排放量”作为非期望产出，以期契合国家政策导向，全面反映区域绿色发展效率真实情况。

1.4　研究方法

1.4.1　超效率EBM-GML模型　混合距离函数模型（EBM）将投入前沿值与实际值的径向比例有机融合，兼顾数据包络分析径向与非径向方法优势，科学考察效率变化规律[15]。在此基础上，通过构建



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4623号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　黄河流域区位示意图

Fig. 1　Location diagram of the Yellow River Basin

表1 黄河流域城市绿色发展效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of urban green development efficiency in the Yellow River Basin

系统层	要素层	指标层	单位	属性
投入	劳动	全市年末单位从业人数	10^4人	+
		规模以上工业企业数	个	+
	资本	科学技术支出	10^4元	+
		全社会固定资产投资	10^4元	+
		城市建设用地面积	km^2	+
	能源	供气总量	10^4 t	+
		供水总量	m^3	+
		用电总量	10^4 kW·h	+
产出	期望产出	人均绿地面积	m^2	+
		人均社会消费零售额	元	+
		绿色专利申请数量	件	+
	非期望产出	工业废水排放量	10^4 t	−
		工业SO_2排放量	t	−
		工业固体废弃物排放量	t	−
		城市CO_2排放量	t	−

注:+、−分别表示正向属性与负向属性。

Global Malmquist-Luenberger(GML)指数并进行分解,测算绿色全要素生产率(GTFP)。本文采用超效率EBM-GML模型,测算得到黄河流域城市绿色发展效率,公式如下:

$$r^* = \min \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^{m} \frac{w_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^{s} \frac{w_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon_z \sum_{p=1}^{q} \frac{w_p^{z-} s_p^{z-}}{z_{pk}}} \tag{1}$$

$$\text{s.t}\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j + s_i^- = \theta x_{ik}, \ (i = 1, 2, 3, \cdots, m) \\ \sum_{j=1}^{n} y_{rj}\lambda_j - s_r^+ = \varphi y_{rk}, \ (r = 1, 2, 3, \cdots, s) \\ \sum_{j=1}^{n} z_{pj}\lambda_j + s_p^{z-} = \varphi z_{pk}, \ (p = 1, 2, 3, \cdots, q) \\ \lambda_j \geqslant 0, s_i^- \geqslant 0, s_r^+ \geqslant 0, s_p^{z-} \geqslant 0, \ (k = 1, 2, 3, \cdots, K) \end{cases} \tag{2}$$

式中:r^*为综合效率值;m、s和q分别为投入、期望产出和非期望产出指标数量;K为决策单元数量;s_i^-、s_r^+、s_p^{z-}分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量;x_{ik}、y_{rk}和z_{pk}分别为第k个决策单元的i种投入、第r种期望产出和第p种非期望产出;x_{ij}、y_{rj}和z_{pj}分别为被评估单元的投入、期望产出和非期望产出;w_i^-、w_r^+和w_p^{z-}分别为投入、期望产出和非期望产出指标权重;λ_j为权重向量;ε_x、ε_y、ε_z为非径向部分重要程度的核心参数;θ为径向条件下的效率值;φ为产出系数。

1.4.2 HP滤波分析法 HP滤波分析是刻画系统周期运行规律的重要方法,通过解析时间序列数据的低频趋势成分和高频周期成分,揭示其阶段性演变特征[29]。本文借助HP滤波分析法对黄河流域城市绿色发展效率进行分解,映射其周期波动规律。公式如下:

$$X_t = X_t^T + X_t^C, t = 1, 2, 3, \cdots, T \tag{3}$$

通过HP滤波分析将X_t序列以求解最小化方式将时间序列X_t^T分离,则X_t^T最小化解为:

$$\min\left\{\sum_{t=1}^{T}\left(X_t - X_t^T\right)^2 + \lambda\left[C(L)X_t^T\right]^2\right\} \tag{4}$$

$$C(L) = \left(L^{-1} - 1\right) - (1 - L) \tag{5}$$

将公式(3)代入公式(2):

$$\min\sum_{t=1}^{T}\left\{\left(X_t - X_t^T\right)^2 + \lambda\sum_{t=2}^{T-1}\left[\left(X_{t+1}^T - X_t^T\right) - \left(X_t - X_{t-1}^T\right)^2\right]\right\} \tag{6}$$

式中:X_t为经济时间序列;X_t^T为系统中的趋势成分;X_t^C为波动成分;C为波段;$C(L)$为延迟算子多项式;L为滞后算子;λ为平滑参数;T为年份。

1.4.3 时空交互分析方法

(1) LISA时间路径

LISA时间路径通过揭示变量在Moran散点图中LISA坐标的移动情况,说明其在一定时空范围内的动态特征[30]。本文通过比较黄河流域城市绿色发展效率属性值与空间滞后值的迁移情况,对应解释其时空交互特征,公式为:

$$U = \frac{S\sum_{t=1}^{T-1} d\left(L_{i,t}, L_{i,t+1}\right)}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T-1} d\left(L_{i,t}, L_{i,t+1}\right)} \tag{7}$$

$$\beta = \frac{\sum_{t=1}^{T=1} d\left(L_{i,t}, L_{i,t+1}\right)}{d\left(L_{i,1}, L_{i,T}\right)} \tag{8}$$

式中:U为相对长度;β为弯曲度;N为城市数量;$d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$为城市i从t到t+1年间的移动距离;$d(L_{i,t}, L_{i,T})$为城市i从t年到末年的迁移距离;T为年份。若U、β均大于1,表明城市绿色发展效率局部空间结构与依赖方向的动态性强,反之,则较为稳定。

(2) 时空交互可视化

通过计算绿色发展效率LISA时空移动轨迹的协方差相关系数,借助时空拓扑网络将各城市竞合关系进行可视化展示[30]。根据协方差相关系数大小分为4种类型:强正向关联(0.5~1.0)、弱正向关

联(0.0~0.5)、强负向关联(-1.0~-0.5)与弱负向关联(-0.5~0.0)。当该数值大于0时,为正向关联,表明邻接城市在时空变迁过程中处于正向协同状态;当该数值小于0时,为负向关联,表明邻接城市间存在时空竞争;当该数值为0时,说明邻接城市间不存在动态关联。

1.4.4　模糊集定性比较分析方法(fsQCA)　fsQCA充分借鉴QCA以前因条件多种组合方式解释组态现象互赖性和因果关系复杂性的优势,并在此基础上进一步处理部分类属和变化问题。该方法采用覆盖度(Coverage)和一致性(Consistency)2项指标,测度前因变量及其组合与结果变量的因果关系,逐步辨明不同要素以何种联结方式对结果产生影响[31]。本文借助fsQCA组态法有效识别诸要素联合对黄河流域城市绿色发展效率影响的提升路径,公式为:

$$\text{Coverage}\left(A_i \leqslant B_i\right)=\sum\left[\min\left(A_i,B_i\right)\right]/\sum\left(B_i\right) \quad (9)$$

$$\text{Consistency}\left(A_i \leqslant B_i\right)=\sum\left[\min\left(A_i,B_i\right)\right]/\sum\left(A_i\right) \quad (10)$$

式中:A_i为第i个城市绿色发展效率影响因素对前因组合的隶属度;B_i为第i个城市绿色发展水平对结果变量的隶属度。其中,若Consistency>0.8时,则判定前因变量可以作为结果的充分条件;若Consistency>0.9时,则判定解释变量是被解释结果的必要条件。此外,Coverage指选定的组态对于分析结果的解释程度。

2　结果与分析

2.1　黄河流域城市绿色发展效率的时空特征分析

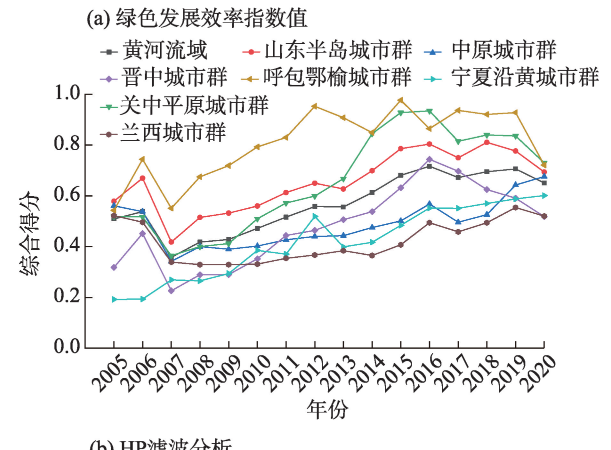
2.1.1　时序演进特征　由图2可知,黄河流域城市绿色发展效率呈递增趋势,由2005年的0.509提升至2020年的0.651;其中,关中平原城市群增幅最大,相较基期增长了29.024%;呼包鄂榆城市群、山东半岛城市群基本高于平均水平;晋中城市群、中原城市群、宁夏沿黄城市群、兰西城市群仍显滞后。

利用Eviews 7.0对研究区绿色发展效率进行HP滤波分解,得到其趋势成分和波动成分。按照"峰-峰法"将演变周期划分为"波动—提升—共生"3个阶段:

(1) 2005—2009年,波动发展。宁夏沿黄城市群饱受干旱困扰,违规取水问题频发;中原城市群、晋中城市群重力侵蚀严重,水土流失面积持续增加。各城市绿色发展效率虽有所提升,但在动能缺乏、能源重任等多重约束下,传统粗放发展模式尚未得到明显改变。

(2) 2010—2015年,明显提升。关中平原城市群通过除险加固,对坡耕地进行综合治理;晋中城市群通过加强大中型淤地坝修护,实现淤地坝管理信息化、科学化;中原城市群因地施策,形成种植养殖相结合的集约发展模式,构建生态农业循环产业链。这一阶段在各城市通力协作下,绿色发展效率显著提升。

(3) 2016—2020年,渐趋稳定。随着《国家重点生态功能保护区规划纲要》《全国生态脆弱区保护规划纲要》《国家重点生态功能区转移支付办法》等文件的相继出台,沿黄城市协作力度不断增强,甘肃兰白经济区、宁夏银川-石嘴山、晋陕豫黄河金三角逐渐承接产业转移示范区作用,通过优化土地、资金、技术等生产要素空间配置,特大城市综合功能实现瘦身健体、减量增效。



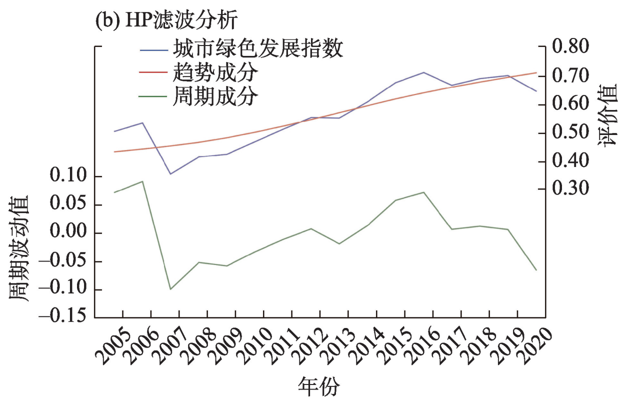


图2　2005—2020年黄河流域城市绿色发展效率及HP滤波分析

Fig. 2　Urban green development efficiency and HP filtering analysis in the Yellow River Basin from 2005 to 2020

2.1.2 空间分异特征 参考郭付友等[2]的分类方法，将黄河流域城市绿色发展效率分为5类：0≤D<0.2（低效率）、0.2≤D<0.4（较低效率）、0.4≤D<0.6（中效率）、0.6≤D<0.8（较高效率）、0.8<D≤1（高效率），借助ArcGIS 10.2软件进行空间可视化分析（图3）。总体来看，绿色发展效率从中间到四周不断弱化，城际发展尚不平衡，高值区集中在呼包鄂榆城市群、关中平原城市群。具体来看：（1）2005年，以低效率、较低效率类型为主，占比分别为37.931%、34.483%，呈团块化集聚分布；（2）2010年，低效率城市增加到31个，占比为53.448%，较低效率类型城市为14个，占比为24.138%，呈“中部高、四周低”的特点；（3）2015年，低效率城市减少到12个，占比为20.690%，16个城市为高效率类型，占比为27.500%，主要分布在呼包鄂榆城市群、关中平原城市群；（4）2020年，绿色发展效率整体下滑，较低效率城市增至24个，占比为41.379%，较高效率以上城市为14个，占比为24.138%。由此可知，黄河流域城市绿色发展效率虽有较大程度提升，但其非均衡性特征显著，极化效应依然存在，城际协作联动能力仍需加强。

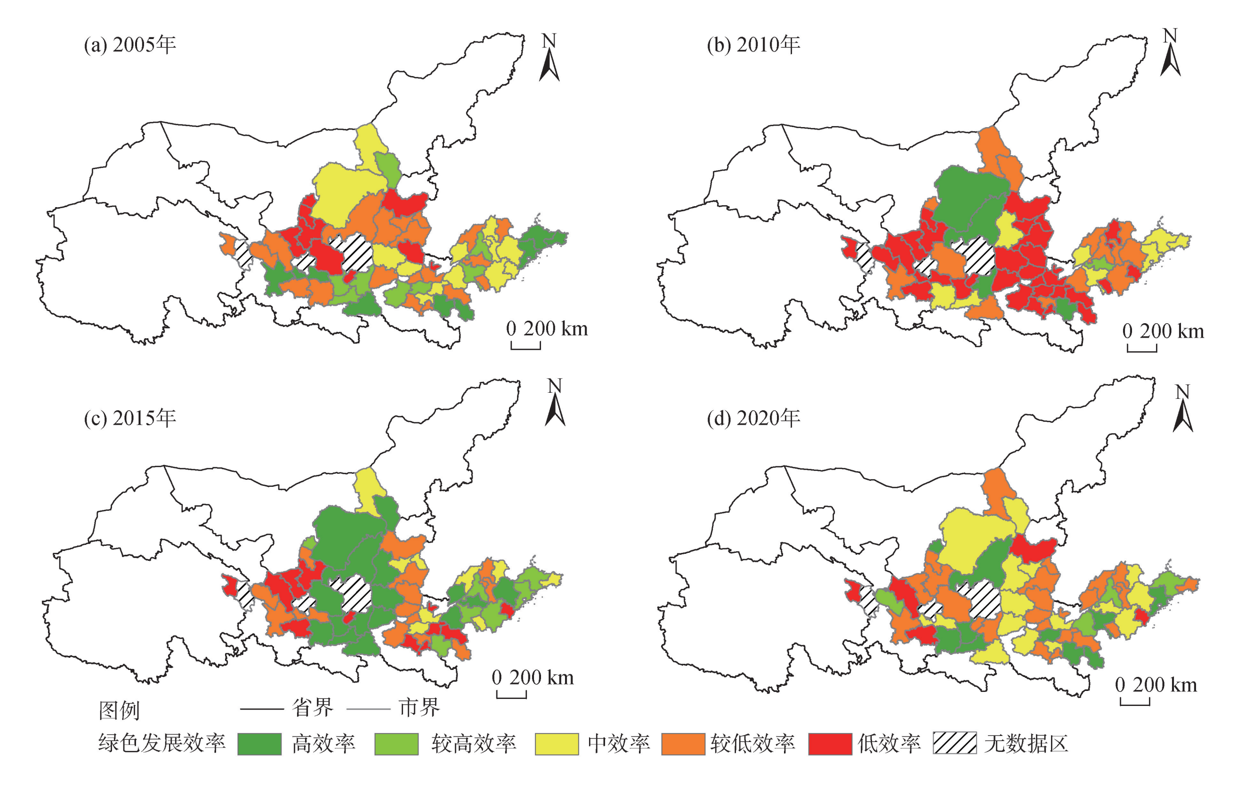


图3 2005—2020年黄河流域城市绿色发展效率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of urban green development efficiency in the Yellow River Basin from 2005 to 2020

2.1.3 时空交互特征

（1）LISA时间路径相对长度

由图4可知，小于相对长度1的城市共有33个，占比为58.897%，证实研究区绿色发展效率局部空间结构具有较强稳健性。各子城市群排序依次为：呼包鄂榆城市群（1.339）>关中平原城市群（1.302）>晋中城市群（1.160）>宁夏沿黄城市群（1.101）>兰西城市群（1.012）>山东半岛城市群（0.807）>中原城市群（0.766），表明山东半岛城市群、中原城市群、晋中城市群局部空间结构较为稳定，存在一定迁移惰性；呼包鄂榆城市群、关中平原城市群、宁夏沿黄城市群动态性较强，变化幅度较大，这些城市在“资源诅咒”效应影响下，黑色发展模式尚未得到有限改善。

（2）LISA时间路径弯曲度

研究期内，弯曲度均大于1（图4），说明研究区绿色发展效率空间移动方向较为活跃，呈晋中城市群（14.250）>呼包鄂榆城市群（12.089）>关中平原城市群（12.079）>中原城市群（9.561）>山东半岛城市群（8.758）>宁夏沿黄城市群（5.911）>兰西城市群（4.267）的分布特征。其中，晋中城市群、呼包鄂榆城市群、关中平原城市群空间移动方向波动幅度较

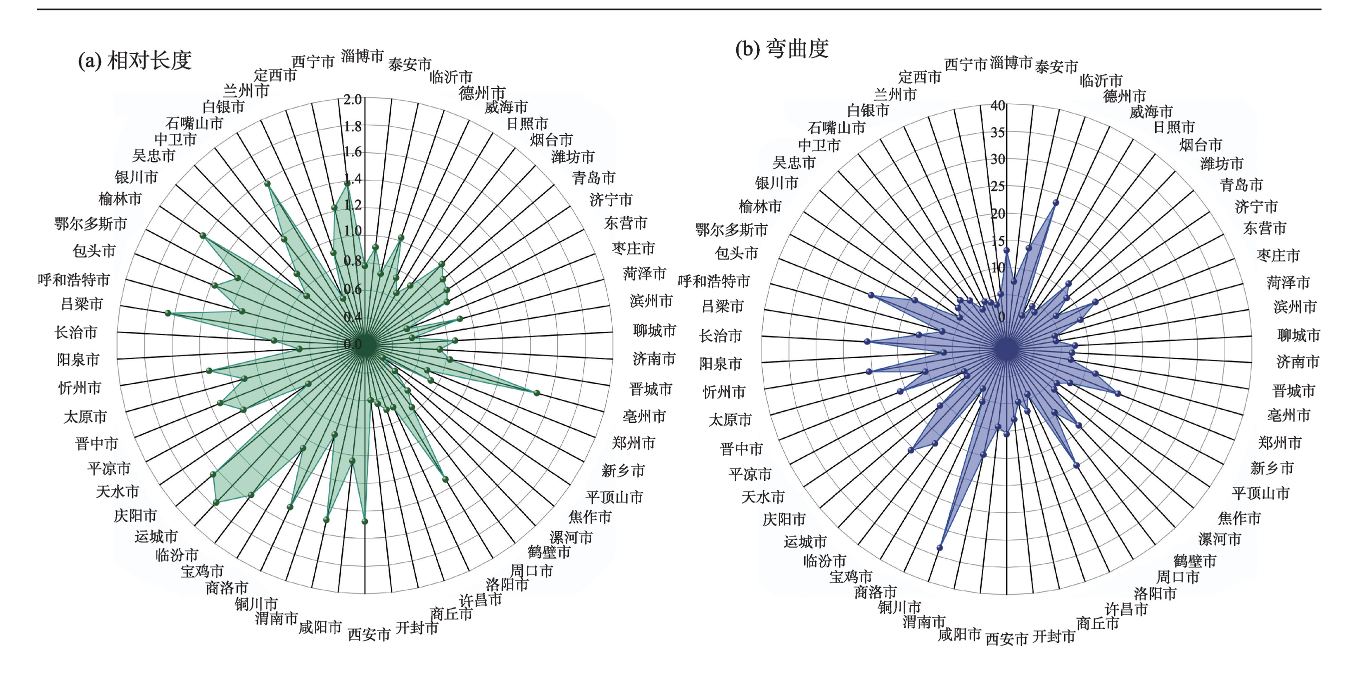


图4　2005—2020年黄河流域城市绿色发展效率的LISA时间路径

Fig. 4　LISA time path of urban green development efficiency in the Yellow River Basin from 2005 to 2020

大。铜川、德州、洛阳等地级市呈现较强波动性，这些城市大多处于省际交界带，受到高值区与低值区的交叠影响，变化幅度较大。

（3）时空交互关联特征

由图5可知，区域时空网络格局以正向关联为主，占比超过75%，呈负向关联城市共有25对，占比达21.739%，说明黄河流域城市绿色发展协作程度不断加深，但部分城市时空竞争现象依然存在，空间合作大于空间竞争。其中，泰安和临沂、临汾和吕梁、阳泉和忻州等为强负相关状态，这些城市自然资源禀赋与水源涵养能力不同，产业结构、发展模式、治理能力存在较大差异，因此绿色发展效率不均衡特征显著；烟台与潍坊、郑州与焦作、银川与吴忠等表现为强正向关联，这些城市通过深化流域治理体制和市场化改革，综合运用硬性工程措施与柔性调蓄手段，实现绿色发展效率正向增长。

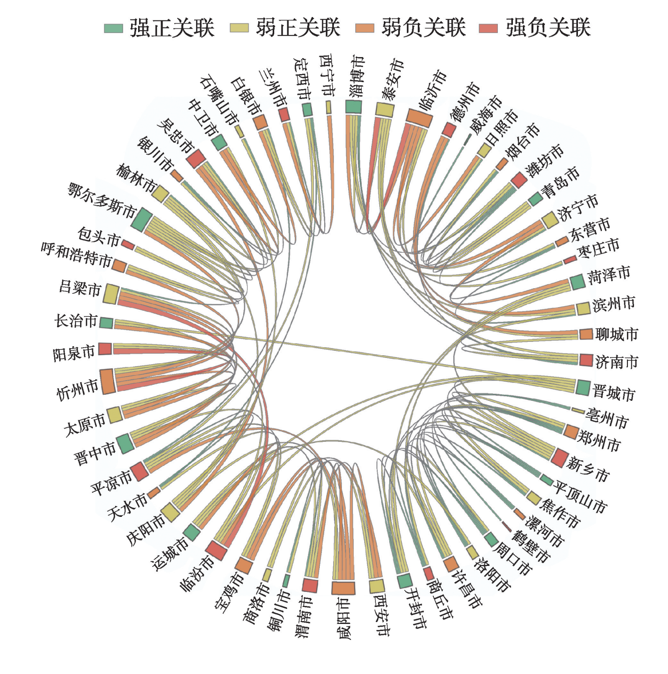


图5　2005—2020年黄河流域城市绿色发展效率的时空拓扑网络

Fig. 5　Spatial-temporal topology network of urban green development efficiency in the Yellow River Basin from 2005 to 2020

2.2 黄河流域城市绿色发展效率的提升路径分析

2.2.1 前因变量选取与变量校准　本文以不同时段城市绿色发展效率均值为结果变量，遴选6项因子为前因变量进行综合分析，其中经济发展（ECO）采用人均GDP[15]表示；城镇化水平（URB）采用常住人口城镇化率[20]表示；产业结构（IND）采用第三产业增加值占GDP比重[18]表示；外商投资（FDI）选取外商直接投资占城市GDP比重[28]表征；科技创新（INO）选取科技创新支出占GDP比重[27]表征；环境规制（ENV）选取工业固定废弃物综合利用率[27]表征。

此外，采用四分位点法设定3个锚点值，将样本

数据上四分位点(75%分位值)设置为完全隶属点,将数据中位数(50%分位值)设置为交叉点,将下四分位点(25%分位值)设置为完全不隶属点。考虑到每个5 a规划期有着不同政策环境和目标愿景,提升路径存在差异,选择"十一五""十二五"和"十三五"3个时期分别进行比较(表2)。

2.2.2 条件变量的必要性分析 在进行条件组态分析前,采用fsQCA4.0软件测算各变量的一致性与覆盖度。结果表明(表3),各因子一致性均低于0.900,说明不存在单因子成为必要条件,提升路径由多项前因变量联结形成。因此,有必要汇集各项前因变量展开组态分析。

表2 变量校准锚点

Tab. 2 Anchor points for variable calibration

变量	"十一五"时期模糊校准点			"十二五"时期模糊校准点			"十三五"时期模糊校准点		
	完全隶属	交叉点	完全不隶属	完全隶属	交叉点	完全不隶属	完全隶属	交叉点	完全不隶属
城市绿色发展效率(GTFP)	0.537	0.404	0.301	0.757	0.538	0.364	1.002	0.645	0.459
经济发展(ECO)	3.122	1.887	1.222	5.648	3.934	2.644	7.398	5.233	3.668
城镇化水平(URB)	0.569	0.442	0.371	0.627	0.491	0.421	0.692	0.558	0.494
产业结构(IND)	0.601	0.496	0.417	0.570	0.486	0.419	0.496	0.417	0.344
外商投资(EDI)	0.350	0.120	0.030	1.195	0.440	0.170	2.930	1.370	0.390
科技创新(INO)	3.064	1.003	0.322	6.805	2.650	0.548	7.801	2.244	0.559
环境规制(ENV)	0.970	0.871	0.660	0.984	0.916	0.733	0.944	0.829	0.593

表3 单因子必要性分析结果

Tab. 3 Single factor necessity analysis results

变量	"十一五"时期		"十二五"时期		"十三五"时期	
	一致性	覆盖度	一致性	覆盖度	一致性	覆盖度
经济发展(ECO)	0.624	0.617	0.776	0.713	0.633	0.618
~经济发展(ECO)	0.466	0.457	0.295	0.605	0.469	0.447
城镇化水平(URB)	0.579	0.605	0.780	0.718	0.619	0.621
~城镇化水平(URB)	0.505	0.470	0.305	0.623	0.498	0.463
产业结构(IND)	0.436	0.614	0.296	0.687	0.558	0.542
~产业结构(IND)	0.622	0.471	0.758	0.663	0.558	0.533
外商投资(EDI)	0.887	0.495	0.846	0.748	0.654	0.648
~外商投资(EDI)	0.031	0.887	0.208	0.467	0.460	0.434
科技创新(INO)	0.636	0.664	0.562	0.736	0.592	0.577
~科技创新(INO)	0.457	0.427	0.513	0.631	0.526	0.502
环境规制(ENV)	0.594	0.586	0.415	0.723	0.559	0.521
~环境规制(ENV)	0.488	0.480	0.669	0.667	0.547	0.548

注:~表示条件不存在。

2.2.3 条件组态的充分性分析 为揭示多元路径对黄河流域城市绿色发展效率的影响程度,对条件组态进行充分性分析(表4)。将一致性(raw)阈值设置为0.800,将子集关系一致性(PRI)阈值设置为0.700,将案例评述阈值设定为1.000。由于中间解更接近理论实际,使用中间解,并参考简单解进行结果分析。

如表4所示,研究期内共有8种组态路径,各因子一致性均高于最低接受标准0.750,总体覆盖度分别为0.459、0.484、0.457,表明这些组态是影响研究区绿色发展效率的充分条件。根据各组态共性特点,将其分为4种类型(图6):

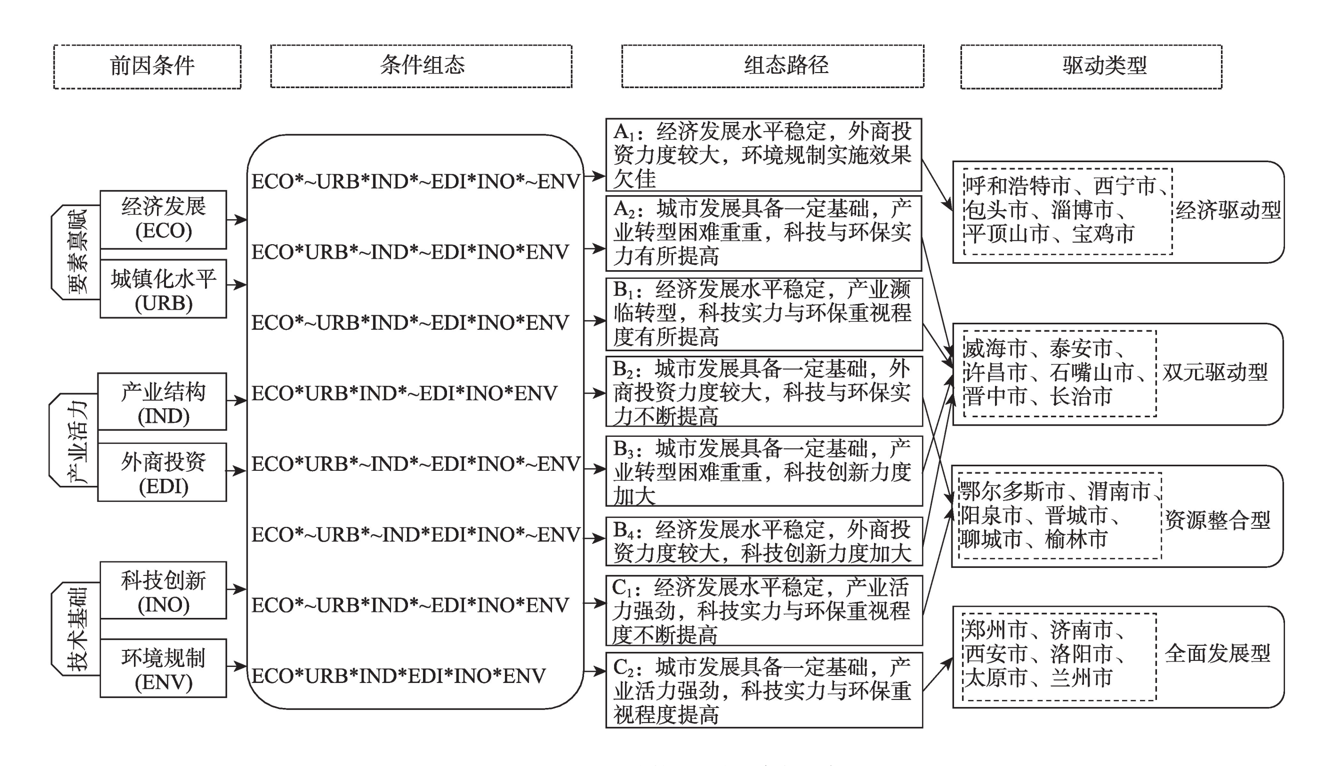
(1) 经济驱动型。表现为"十一五"时期的组态A_1,其中经济发展为核心条件,产业结构、科技创新为边缘条件,典型城市为呼和浩特、西宁、包头、淄博、平顶山、宝鸡等。这一时期呼和浩特、西宁等城

表4　黄河流域城市绿色发展效率的组态结果

Tab. 4　Configuration results of urban green development efficiency in the Yellow River Basin

变量	“十一五”时期		“十二五”时期				“十三五”时期	
	组态A_1	组态A_2	组态B_1	组态B_2	组态B_3	组态B_4	组态C_1	组态C_2
经济发展(ECO)	●	●	●	•	●	●	●	●
城镇化水平(URB)	⊗	•	⊗	•	•	–	⊗	●
产业结构(IND)	•	⊗	•	●	⊗	⊗	●	●
外商投资(EDI)	⊗	–	–	⊗	⊗	•	⊗	•
科技创新(INO)	•	●	●	●	●	●	●	●
环境规制(ENV)	⊗	•	•	●	–	⊗	●	●
一致性	0.877	0.884	0.849	0.898	0.913	0.926	0.832	0.902
原始覆盖度	0.140	0.112	0.469	0.114	0.076	0.145	0.114	0.094
唯一覆盖度	0.048	0.019	0.042	0.005	0.005	0.079	0.175	0.155
总体一致性	0.867		0.826				0.874	
总体覆盖度	0.459		0.484				0.457	

注:●为核心条件存在;•为边缘条件存在;⊗为核心条件缺失;⊗为边缘条件缺失;–为该条件可有可无。



注:*为组态间的连接符号;~表示条件不存在。

图6　2005—2020年黄河流域城市绿色发展效率的组态路径解析

Fig. 6　Configuration path analysis of urban green development efficiency in the Yellow River Basin from 2005 to 2020

市通过扩大资金投入,加强荒漠化防治,生态保护效果显著;包头、淄博、榆林、宝鸡作为资源型城市,通过市场化方式推进矿山生态修复,调整产业结构,逐步提高能源利用率。

(2) 双元驱动型。表现为“十一五”时期的组态A_2、“十二五”时期的组态B_1、组态B_3、组态B_4,这一类型中经济发展和科技创新作为核心条件同时存在,典型案例地为威海、泰安、许昌、石嘴山、晋中、长治等。这一时期威海、泰安、许昌等城市通过完善市场融资体制,构建新材料产业集群,绿色技术创新不断增强;石嘴山、晋中、长治等城市拓展资源一体化开发渠道,推动能源化工产业向深加工、精出品发展,延长能源产业生命线,绿色发展效率明显提高。

(3) 资源整合型。表现为"十二五"时期的组态B_2、"十三五"时期的组态C_1,其中科技创新、产业结构、环境规制为核心条件存在,典型城市为鄂尔多斯、渭南、阳泉、晋城、聊城、榆林等。这一时期鄂尔多斯市持续开展水污染防治,水环境安全程度提高;渭南市引入绿色清洁技术,提升城镇污水厂氨氮去除率;阳泉、晋城、聊城、榆林等城市通过推动煤炭产业绿色化发展,加快矿井智能化改造,绿色生产水平提高。

(4) 全面发展型。表现为"十三五"时期的组态C_2,这类组态的所有解释因子均存在,核心条件为经济发展、城镇化水平、产业结构、科技创新、环境规制,典型案例地为郑州、济南、西安、洛阳、太原、兰州等。这一时期黄河流域通过加强晋陕豫黄河金三角区域经济联系,建设郑(州)洛(阳)西(安)高质量发展合作带,城市协作网络日益完善。晋中城市群、山东半岛城市群与京津冀地区开展科技创新、跨界金融、产业能源等深度合作,实现环境治理"一张网"覆盖与产业发展"一条线"畅通。

研究发现,经济发展、科技创新均存在于8条路径中,在此基础上叠加城镇化水平、产业结构、外商投资与环境规制等因素,共同助力城市绿色发展效率整体跃迁。

2.2.4 稳健性检验 参考吴成颂等[30]的研究,对结果进行稳健性检验。(1) 将案例频数阈值由1提升至2,所形成组态与前文结果基本一致;(2) 将PRI一致性从0.700提高至0.750,所得结果包含现有组态结果;(3) 将完全不隶属、完全隶属锚点优化调整为15%分位数和85%分位数,交叉点始终保持稳定,所得结果与现有组态一致;(4) 对交叉点锚点进行调整,将中位数更换为45%分位数,重新校准后结果与现有组态保持一致。

3 讨 论

本文通过研究发现,黄河流域城市绿色发展效率具有阶段性、非线性和非均衡性特征,与陈明华等[1]、郭付友[2]等学者结论一致。与此同时,孟望生等[3]仅分析了黄河流域七大城市群绿色发展效率的时空演进特征,未对提升策略进行定量识别。与以往研究相比,本文主要贡献体现在基于"双碳目标",增加城市CO_2排放量这一指标,对绿色发展效率评价体系进行补充完善,采用时空交互方法揭示系统时空演进特征,弥补既有研究仅注重考察区域时空二维演进规律的匮缺,并采用fsQCA方法将提升路径研究推至实证。与此同时,本文仍存在不足之处尚待完善:绿色发展效率涉及范围众多,今后可进一步利用多源数据完善评价体系设计。同时,有待从实证研究层面揭示黄河流域城市绿色发展效率时空分异的驱动机制,以期为促进人地关系地域系统优化协调,助力沿黄城市高质量发展提供学术参考。

4 结 论

(1) 从时空演进特征来看,黄河流域城市绿色发展效率呈递增趋势,由2005年的0.509提升至2020年的0.651,演变周期分为"波动—提升—共生"3个阶段;绿色发展效率从中心城市到外围城市不断弱化,城际发展尚不平衡。

(2) 从时空交互特征来看,研究区绿色发展效率的局部空间结构具有较强稳健性,各城市空间移动方向波动性较强,城际协作程度虽在不断加深,但部分区域的时空竞争现象依然存在,空间协作程度大于空间竞争。

(3) 从优化提升路径来看,形成经济驱动型、双元驱动型、资源整合型、全面提升型4种类型。其中,经济发展、科技创新是必要条件,在城镇化水平、产业结构、外商投资与环境规制联合作用下,助力黄河流域城市绿色高质量发展。

参考文献(References)

[1] 陈明华, 刘文斐, 王山, 等. 黄河流域绿色发展绩效评价、差异分解及驱动因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 126-133. [Chen Minghua, Liu Wenfei, Wang Shan, et al. Performance evaluation, difference decomposition and driving factors of green development in the Yellow River Basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(4): 126-133.]

[2] 郭付友, 高思齐, 佟连军, 等. 黄河流域绿色发展效率的时空演变特征与影响因素[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 167-180. [Guo Fuyou, Gao Siqi, Tong Lianjun, et al. Spatio-temporal evolution track and influencing factors of green development efficiency in Yellow River Basin[J]. Geographical Research, 2022, 41(1): 167-180.]

[3] 孟望生, 刘华桢, 张扬. 黄河流域七大城市群绿色发展效率测度及特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 846-856. [Meng Wangsheng, Liu Huazhen, Zhang Yang. Measurement and characterization of green development efficiency in seven urban agglomera-

tions in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 846-856.]

[4] 张娜, 郭爱君. 服务业集聚对黄河流域城市绿色经济效率的影响研究[J]. 城市问题, 2022, 321(4): 35-44, 86. [Zhang Na, Guo Aijun. The impact of service industry agglomeration on green economic efficiency of cities in the Yellow River Basin[J]. Urban Issues, 2022, 321(4): 35-44, 86.]

[5] 邬彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 105-117. [Wu Caixia. Research on the synergistic effect of low-carbon economy in China[J]. Journal of Management World, 2021, 37(8): 105-117.]

[6] 鹿晨昱, 黄萍, 张彤, 等. 甘肃省绿色发展效率时空演化与驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 305-315. [Lu Chenyu, Huang Ping, Zhang Tong, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of the green development efficiency in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 305-315.]

[7] 周丽, 夏玉辉, 陈文颖. 中国低碳发展目标及协同效益研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 10-17. [Zhou Li, Xia Yuhui, Chen Wenying. Review of low carbon development targets and relative co-benefits in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(7): 10-17.]

[8] 范育鹏, 方创琳. 生态城市与人地关系[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4313-4323. [Fan Yupeng, Fang Chuanglin. Eco-city and man-land relationship[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4313-4323.]

[9] 史晨辰, 朱小平, 王辰星, 等. 韧性城市研究综述——基于城市复杂系统视角[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1726-1737. [Shi Chenchen, Zhu Xiaoping, Wang Chenxing, et al. Review and prospect of resilient cities: From the perspective of urban complex systems[J]. Acta Ecological Sinica, 2023, 43(4): 1726-1737.]

[10] OECD. Towards green growth: A summary for policy makers[R]. Paris: OECD, 2011.

[11] UNEP. Green economy: Cities Investing in energy and resource efficiency[R]. Nairobi: UNEP, 2011.

[12] 北京师范大学经济与资源管理研究院, 西南财经大学发展研究院, 国家统计局中国经济景气监测中心. 2016中国绿色发展指数报告——区域比较[R].北京: 北京师范大学出版社, 2016. [Institute of Economics and Resources Management, Beijing Normal University, Institute of Development, Southwestern University of Finance and Economics, China Economic Prosperity Monitoring Center, National Bureau of Statistics. China green development index report 2016: Regional comparison[R]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2016.]

[13] 张英浩, 陈江龙, 程钰 .环境规制对中国区域绿色经济效率的影响机理研究——基于超效率模型和空间面板计量模型实证分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2407-2418. [Zhang Yinghao, Chen Jianglong, Cheng Yu. Study on the influence mechanism of environmental regulation on green efficiency in China: Empirical analysis based on super efficiency model and spatial panel metering model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(11): 2407-2418.]

[14] 郗永勤, 吉星. 我国工业行业碳排放效率实证研究——考虑非期望产出SBM超效率模型与DEA视窗方法的应用[J]. 科技管理研究, 2019, 39(17): 53-62. [Xi Yongqin, Ji Xing. An empirical study on carbon emission efficiency of industrial industry in China: Considering the super efficiency model of unexpected output SBM and the application of DEA window method[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(17): 53-62.]

[15] 童昀, 刘海猛, 马勇, 等. 中国旅游经济对城市绿色发展的影响及空间溢出效应[J]. 地理学报, 2021, 76(10): 2504-2521. [Tong Yun, Liu Haimeng, Ma Yong, et al. The influence and spatial spillover effects of tourism economy on urban green development in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(10): 2504-2521.]

[16] Cheng C Y, Ge C Z. Green development assessment for countries along the Belt and Road[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110344, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110344.

[17] Liu K D, Dong S S, Wen T Z, et al. How has the efficiency of China's green development evolved? An improved non-radial directional distance function measurement[J]. Science of the Total Environment, 2022, 815: 152337, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152337.

[18] Yang Y, Huang P P. Has the level of green development in the northwestern provinces of China truly improved? A case study of Shaanxi[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51(4): 101779, doi: 10.1016/j.scs.2019.101779.

[19] 张军民, 荣城, 马玉香. 新疆城镇化绿色发展时空分异及驱动因子探究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 251-262. [Zhang Junmin, Rong Cheng, Ma Yuxiang. Spatial and temporal differences and driving factors of the green development of urbanization in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 251-262.]

[20] 窦睿音, 焦贝贝, 张文洁, 等. 西部资源型城市绿色发展效率时空分异与驱动力[J]. 自然资源学报, 2023, 38(1): 238-254. [Dou Ruiyin, Jiao Beibei, Zhang Wenjie, et al. Research on spatiotemporal heterogeneity and driving forces of green development efficiency in resource-based cities in western China[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(1): 238-254.]

[21] 赵伟, 黄兰, 李威, 等. 中国乡村包容性绿色发展水平分异及其驱动因素[J]. 经济地理, 2023, 43(3): 68-77. [Zhao Wei, Huang Lan, Li Wei, et al. The level differentiation driving factors of inclusive green development in rural areas of China[J]. Economic Geography, 2023, 43(3): 68-77.]

[22] 张凯莉, 冯荣荣, 刘潭, 等. 黄河流域城市化与生态系统服务价值协调性及障碍因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1254-1267. [Zhang Kaili, Feng Rongrong, Liu Tan, et al. Coordination and obstacle factors of urbanization and ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1254-1267.]

[23] 徐小鹰, 田焮焮. 长三角城市群绿色发展水平的时空演变及趋势预测[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(12): 2568-2581. [Xu Xiaoying, Tian Xinxin. Spatial-temporal evolution and trend prediction of green development level of Yangtze River Delta urban agglomerations[J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2022, 31(12): 2568-2581.]

[24] 孙金欣, 韩美, 孔祥伦, 等. 黄河下游自然保护地时空分布特征与高质量发展建议——以山东省为例[J]. 水土保持研究, 2023,

30(3): 395-402, 412. [Sun Jinxin, Han Mei, Kong Xianglun, et al. Spatio-temporal characteristics and suggestions for high-quality development of nature protected areas in the lower reaches of the Yellow River: A case study of Shandong Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 395-402, 412.]

[25] 师博. 黄河流域中心城市高质量发展路径研究[J]. 人文杂志, 2020, 285(1): 5-9. [Shi Bo. Research on high-quality development path of central cities in the Yellow River Basin[J]. Chinese Journal of Humanities, 2020, 285(1): 5-9.]

[26] Chen J D, Gao M, Chen S L, et al. County-level CO_2 emissions and sequestration in China during 1997—2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-12.

[27] 丁玉龙. 城市规模对绿色经济效率的影响及空间效应研究——基于我国285个地级及以上城市数据的实证分析[J]. 城市问题, 2021, 317(12): 58-68. [Ding Yulong. Study on the influence of city scale on the efficiency of green economy and its spatial effect: Empirical evidence form 285 prefecture-level and above cities in China[J]. Urban Issues, 2021, 317(12): 58-68.]

[28] 李治国, 王杰, 王叶薇. 经济集聚扩大绿色经济效率差距了吗?——来自黄河流域城市群的经验证据[J]. 产业经济研究, 2022, 116(1): 29-42. [Li Zhiguo, Wang Jie, Wang Yewei. Does economic agglomeration widen the efficiency gap in green economic efficiency? Evidence from urban agglomerations in the Yellow River Basin[J]. Journal of Industrial Economics, 2022, 116(1): 29-42.]

[29] 彭坤杰, 许春晓, 贺小荣. 长三角地区城市人居环境韧性水平演化特征[J]. 经济地理, 2023, 43(6): 74-84. [Peng Kunjie, Xu Chunxiao, He Xiaorong. Spatiotemporal evolution characteristics of urban human settlement resilience in Yangtze River Delta[J]. Economic Geography , 2023, 43(6): 74-84.]

[30] 王峥, 程占红. "双碳"目标下中国服务业碳强度时空交互特征及跃迁机制[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 54-70. [Wang Zheng, Cheng Zhanhong. Spatiotemporal interaction characteristics and transition mechanism of carbon intensity in China's service industry under the targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 54-70.]

[31] 吴成颂, 昂昊. 中国绿色金融效率时空分异及其提升路径[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2456-2469. [Wu Chengsong, Ang Hao. Spatiotemporal variations in the efficiency of green finance in China and its enhancement paths[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2456-2469.]

Measurement and improvement path of urban green development efficiency in the Yellow River Basin under the "carbon peaking and carbon neutrality" targets

SHI Caixia, HE Xiaorong

(Tourism College, Hunan Normal University, Changsha 410081, Hunan, China)

Abstract: Studying and assessing the efficiency of urban green development and delineating its optimization path constitute a key aspect in promoting high-quality development within the Yellow River Basin of China. This endeavor also aligns with the important strategy of realizing the strategic goal of "carbon peak and carbon neutrality". The EBM-GML model was used to calculate the urban green development efficiency of 58 cities in the Yellow River Basin from 2005 to 2020. The evolution characteristics of the study area were outlined through HP filter analysis and spatiotemporal interaction methods, quantitatively identifying multiple lifting paths. The results show the following facts: (1) During the study period, urban green development efficiency in the Yellow River Basin increased from 0.509 in 2005 to 0.651 in 2020, traversing three successive stages of "fluctuation-improvement-symbiosis". Notably, the characteristics of intraregional imbalance were remarkable. (2) The local spatial structure of green development efficiency in the Yellow River Basin is robust, with a highly variable spatial movement direction. Additionally, the degree of spatial collaboration in green development efficiency among cities is greater than that of spatial competition. (3) The fsQCA result shows four optimization paths: economic-driven, dual-driven, resource integration, and comprehensive improvement. Economic development and scientific and technological innovation are indispensable prerequisites for achieving these goals.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality goals; urban green development efficiency; spatiotemporal interaction; fsQCA; Yellow River Basin